

## ПОДВОДНЫЙ ВЗРЫВ В ВОЗДУШНОЙ ПОЛОСТИ

Б. Д. Христофоров

(Москва)

Приводятся результаты измерения параметров ударной волны и газового пузыря при подводном взрыве зарядов из тэна плотностью  $\rho_0 = 1.6 \text{ г/см}^3$  и весом от 0.4 до 2.5 г в центре сферических полостей с воздухом радиусом  $R_1$  от 1.25 до 4.37 см.

Ранее [1] было показано, что в случае подводного взрыва взрывчатого вещества (ВВ) при постоянной массе и энергии заряда его размеры, которые варьировались изменением плотности заряжения, существенно влияют на параметры ударной волны и газового пузыря.

Проведение взрывов в полостях с воздухом позволило определить влияние размеров источника на параметры ударной волны и газового пузыря в воде в более широком диапазоне, чем это было сделано в работе [1].

## Обозначения

$R_1$  см — радиус полости;  $s$  кг — вес ВВ;  
 $R_0$  см — радиус заряда, определяемый с учетом разбрасываемого слоя ВВ, который для тэна равен 0.22 мм;  $Q$  ккал/кг — удельная теплота взрыва ВВ;  
 $cQ$  ккал — энергия взрыва заряда;  
 $R/c^{1/2}$  м/кг<sup>1/2</sup> — приведенное расстояние до источника.

1. Опыты проводились в стальном баке с водой размером  $1.5 \times 1.5 \times 10 \text{ м}^3$ , имеющем смотровые стекла из оптического стекла.

Таблица 1

N	1	2	3	4	5	6	7
$R_1$ см	1.25	1.25	1.75	1.75	1.75	4.17	4.37
$s$ кг $10^{-3}$	2.4	0.84	2.40	0.84	0.42	0.8	0.4
$R_1/R_0$	1.79	2.65	2.64	3.92	5	8.75	11.9

Ударные волны с максимальным давлением  $p < 1000$  атм регистрировались турмалиновыми датчиками давления с диаметром чувствительного элемента 1 мм, с последующей записью сигнала на осциллографе (ПИД-9).

Вблизи от заряда фотографировалось движение фронта ударной волны ждущим фоторегистром (ЖФР) в параллельном пучке проходящего света методом Теплера. В этом случае максимальное давление ударной волны вычислялось при помощи ударной адиабаты воды [2] по скорости фронта, которая определялась графическим дифференцированием кривых  $R = R(t)$  на теплеровских фотографиях.

Движение газового пузыря фотографировалось на приборе (ЖФР) в интервале  $0 \leq t \leq 100$  мксек и на фоторегистре, который позволял производить покадровую съемку на движущуюся пленку в интервале от 100 мксек и до конца его первой пульсации.

Образцы записей оптической аппаратуры приведены в работах [1, 3].

Размеры полостей и веса помещенных в них зарядов приводятся в табл. 1.

Взрыв тэна в воде будем называть нормальным взрывом.

Опытные данные и результаты расчетов приведены на фиг. 1—6 и в табл. 2—6. Для обозначения условий проведения опытов кривые на фиг. 1, 3, 5 и 6 обозначены цифрами 1—7 в соответствии с табл. 1. Индексом 8 отмечен взрыв тэна в воде.

2. Осциллограммы ударной волны на расстоянии 15 см от центра источника показаны на фиг. 1. Зависимость давления от времени представляет собой пуч волн убывающей интенсивности, который возникает при многократном отражении воздушной ударной волны от границ и центра оболочки.



Фиг. 1

Параметры этих волн с увеличением размера полости по сравнению с радиусом заряда ВВ уменьшаются. Время прихода следующих за первой волн не зависит от веса заряда и определяется лишь размерами источника взрыва.

Некоторые результаты пьезоэлектрических измерений параметров ударной волны представлены в табл. 2, в которой приняты следующие обозначения:

Таблица 2

$R$ см	$p$ атм	$\theta$ мксек	$\frac{I}{\text{кг сек}^2/\text{м}^2}$	$E$ кал	$p_2$ атм	$p_3$ атм	$\Delta\tau_2$ мксек	$\Delta\tau_3$ мксек	$p/p_1$
$R_1 = 1.85 \text{ см}, c = 0.84 \text{ г}$									
15	173	6.8	29.2	131	92	66	26.6	23.4	0.502
30	86.5	7.8	18.5	166	45	49	26	—	0.532
45	58	7.2	11.4	127	26.7	29	25.3	23	0.575
60	41.4	7.2	9	142	22.5	24	24	—	0.586
$R_1 = 1.85 \text{ см}, c = 0.42 \text{ г}$									
15	128	6.3	16.6	47.7	65	45.4	24.5	24.6	0.46
30	59.5	5	9	45	27.3	16.1	24.5	24	0.485
45	35	5.5	5.75	36.2	17.7	10.8	21.7	23.4	0.466
60	26.5	5.8	4.4	33	11.4	7.3	21.8	23.2	0.504
$R_1 = 4.37 \text{ см}, c = 0.4 \text{ г}$									
15	60.5	6.7	6.1	8.7	14.9	56.5	0.22		
30	29	5.7	3.43	8.2	10.6	52.5	0.243		
60	13	—	1.43	5.4	4.45	57	0.249		

$p, p_2, p_3$  атм — максимальное давление в первой, второй и третьей волнах цуга соответственно;

$p_1$  — давление во фронте ударной волны при нормальном взрыве;

$\Delta\tau_2, \Delta\tau_3$  мксек — времена между фронтами первой и второй, второй и третьей волн соответственно;

$\theta$  мксек — время, за которое давление в ударной волне падает в  $e$  раз;

$I$  и  $E$  — удельный импульс и энергия цуга ударных волн, которые определялись по формулам

$$I = \int_0^{5 \cdot 5\theta_1} p(t) dt, \quad E = \frac{4\pi R^2}{\rho a} \int_0^{5 \cdot 5\theta_1} p^2(t) dt \quad (2.1)$$

Величина  $\theta_1$  в формуле (2.1) определялась из данных о взрыве тэна в воде [1].

Зависимость максимального давления  $p_0$  ударной волны на границе полости от ее размера показана на фиг. 2, где по осям координат отложены

$$\sqrt{p_0} \text{ атм}^{1/2}, \quad R_1 / c^{1/3} \text{ м/кг}^{1/3}$$

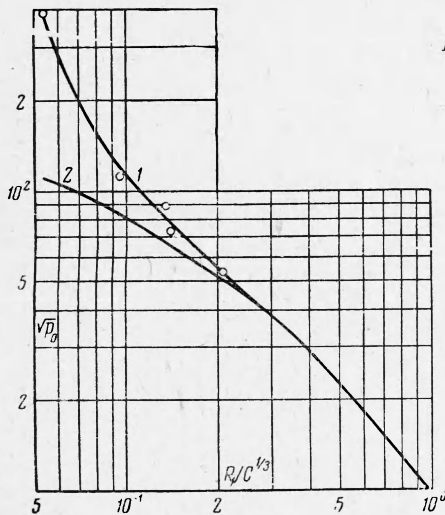
Кривая 1 проведена по экспериментальным точкам, а кривая 2 — в соответствии с результатами расчета отраженного давления воздушной ударной волны от границы раздела воздух — вода.

В расчете были использованы экспериментальные данные о параметрах воздушной ударной волны [3] и ударная адиабата воздуха [4]. Показатель адиабаты воздуха принимался равным его значению на фронте падающей волны.

В диапазоне  $R_1 / c^{1/3} > 0.25$  измеренное и рассчитанное давление отражения  $p_0$  совпадают.

При  $R_1 / c^{1/3} < 0.25$  измеренные значения  $p_0$  значительно выше расчетных. Этот факт объясняется дополнительным динамическим напором, создаваемым продуктами взрыва, которые в этом диапазоне следуют почти вплотную за фронтом воздушной волны.

3. Зависимость максимального давления ударной волны от приведенного расстояния  $R^* = R / c^{1/3}$  показана на фиг. 3. Пунктиром обозначено начальное давление на границе полости. Для сравнения на тот же график нанесена кривая 8 для нормального подводного взрыва. Кривые 9, 10 для  $R_1 = 8$  и  $12 \text{ см}$  и  $c = 0.8 \text{ г}$ , а также 5—7



Фиг. 2

построены по формуле, которая получена из решения П. Ф. Короткова для слабой сферической ударной волны ( $p_0 < 1000 \text{ атм}$ ) экспоненциальной формы [9]

$$\frac{p}{p_0} = \frac{-1 + \sqrt{1 + (n+1) \frac{p_0 R_1}{Bn \lambda} \ln \frac{R}{R_1}}}{\frac{n+1}{2} \frac{R}{R_1} \frac{p_0 R_1}{Bn \lambda} \ln \frac{R}{R_1}} \quad (3.1)$$

Здесь  $\lambda$  — длина ударной волны на границе раздела вода — воздух,

$$n = 7.15, \quad B = 3045 \text{ атм}$$

С увеличением размера полости начальное давление  $p_0$  падает быстрее, чем затухает давление ударной волны в воде, что приводит к ее значительному ослаблению.

При описании экспериментальных данных о максимальном давлении ударной волны в воде удобно пользоваться эмпирической формулой

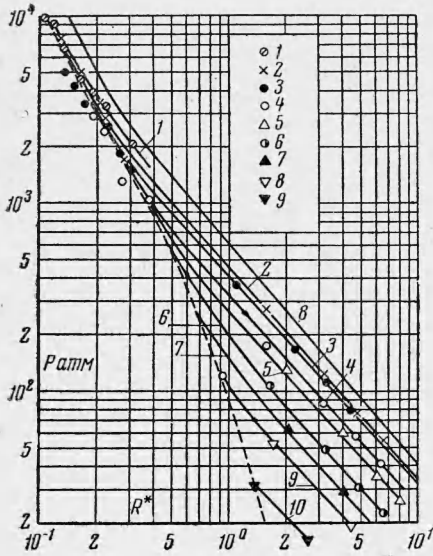
$$p = \frac{9800}{(R^\circ)^3} + \frac{1090}{(R^\circ)^2} + \frac{11600}{R^\circ \sqrt{1 + 1.75 R^\circ}} \quad (3.2)$$

Здесь

$$R^\circ = \frac{R}{R_1 \sqrt{A}} \quad \text{при } A > 0.015$$

$$R^\circ = \frac{R}{2R_1 A^{2/3}} \quad \text{при } 0.001 \leq A \leq 0.015$$

$$R^\circ = \frac{R}{24.3 R_1 A} \quad \text{при } A \leq 0.001$$



Фиг. 3

Безразмерная приведенная плотность энергии взрыва определяется формулой

$$A = \frac{3cQ}{4\pi R_1^3 Bn}$$

На фиг. 4 показан график зависимости  $p = f(R^\circ)$  при тех же обозначениях экспериментальных данных, что и на фиг. 3. Кривая на графике проведена по формуле (3.2), которая удовлетворительно описывает результаты изменений. Зависимость приведенного удельного импульса  $I^\circ = I/c^{1/2}$  от  $R^* = R/c^{1/3}$  показана на фиг. 5. С увеличением размера полости импульс ударной волны в воде уменьшается и при  $R_1/R_0 = 11.9$  он в пять раз меньше, чем в случае нормального взрыва. Экспериментальные данные можно описать эмпирическими формулами

$$\frac{I}{R_1} = \frac{115000}{(R^\circ)^{0.9}} \quad (R^\circ < 100) \quad (3.3)$$

$$\frac{I}{R_1} = \frac{172000}{R^\circ} \quad (R^\circ > 100)$$

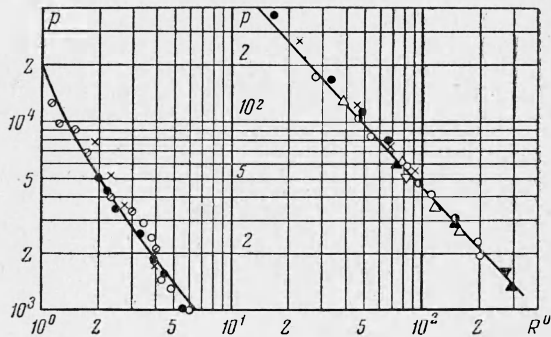
где

$$\frac{I}{R_1} \frac{\text{кгсек}}{\text{м}^3}, \quad R^* = \frac{R}{R_1 A}$$

На фиг. 6 построен график зависимости отношения энергии ударной волны к полной энергии взрыва  $\epsilon = E/cQ$  от приведенного расстояния  $R^* = R/c^{1/3}$ .

С увеличением размера полости энергия ударной волны в воде уменьшается и в случае  $R_1/R_0 = 11.8$  примерно на порядок меньше, чем при нормальном взрыве.

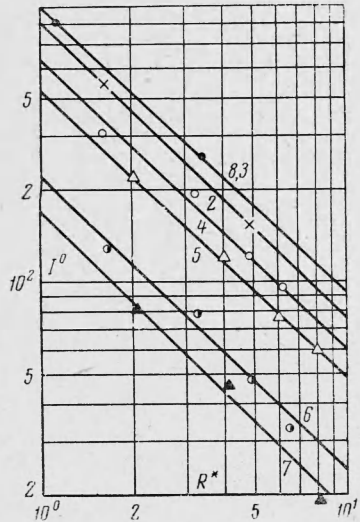
4. Результаты измерения параметров газового пузыря приведены в табл. 3, где приняты следующие обозначения;  $r_m$ , см — максимальный радиус,  $T$ , мсек — период



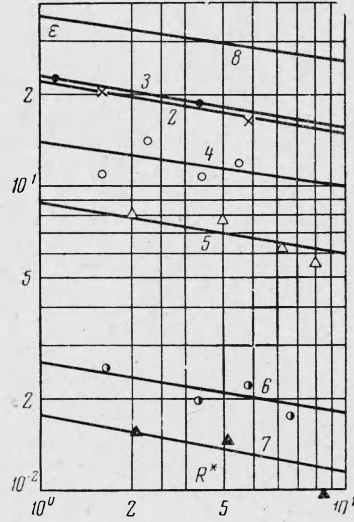
Фиг. 4

первой пульсации;  $Y = 4/3 \pi r_m^3 p_a$  — работа расширения газового пузыря против сил гидростатического давления.

В диапазоне  $1 \leq R_1/R_0 \leq 2.65$  с увеличением радиуса полости параметры газового пузыря увеличиваются. При  $R_1/R_0 = 2.65$  максимальный радиус и период первой пульсации на 15% больше, а работа против сил гидростатического давления на 56% выше, чем в случае нормального взрыва.



Фиг. 5



Фиг. 6

В области  $2.65 \leq R_1/R_0 \leq 10$  параметры газового пузыря уменьшаются с увеличением  $R_1/R_0$  до значений, имеющих место при нормальном взрыве.

При расширении газовой сферы до максимального радиуса, часть ее внутренней энергии затрачивается на работу  $Y$  против сил гидростатического давления  $p_a$ . Остающаяся энергия  $E$  равна сумме внутренней энергии продуктов взрыва  $E_1$  и нагретого воздуха  $E_2$

$$E = E_1 + E_2 = cQ - Y - E_0$$

Начальная энергия ударной волны  $E_0$  определялась экстраполяцией кривых на фиг. 6 до границы полости. Энергия продуктов взрыва  $E_1$  при максимальном расширении газового пузыря была подсчитана при помощи адиабаты Джонса по формуле

$$E_1 = 4.08 \cdot 10^6 \frac{c^{1.25}}{r_m^{3/4}}$$

( $E_1$  — в кал,  $c$  — в кг,  $r_m$  — в см).

В табл. 4 приведены данные об энергии при подводном взрыве в воздушной полости.

С увеличением размера полости энергия ударной волны в воде уменьшается и соответственно возрастает энергия газов в пузыре.

В случае  $R_1/R_0 = 11.3$ ,  $E_0/cQ = 2\%$ , а  $E_1 + E_2 = 65.4\% cQ$ . В диапазоне  $1 \leq R_1/R_0 \leq 2.65$  работа расширения газового пузыря  $Y$  возрастает от 38.2 до 59.8% от полной энергии взрыва  $cQ$ .

При дальнейшем увеличении объема воздушной полости в диапазоне  $2.65 \leq R_1/R_0 \leq 11.3$  величина  $Y$  уменьшается до 32.6%.

Внутренняя энергия продуктов  $E_1$  при максимальном расширении газового пузыря мало меняется с изменением размера полости. В то же время энергия нагретого

Таблица 3

N	c з	$R_1$ , см	$\frac{R_1}{R_0}$	$r_m$ см	T мсек	$\frac{Y}{cQ}$ -%
1	1	0.53	1	17.3	27.4	38.2
2	0.8	1.25	2.65	17.7	29.5	59.8
3	2	1.85	2.86	24.1	36.5	51.2
4	0.86	1.85	3.84	16.9	27	41.2
5	0.8	1.85	3.92	16.5	27	41.4
6	0.77	1.85	3.98	16.2	26	40.5
7	0.4	1.85	5	13.1	22.2	41.2
8	0.8	4.25	9	16.4	—	40.4
9	0.4	4.2	11.3	12.1	—	32.6

Таблица 4

N	c з	$R_1$ см	$\frac{R_1}{R_0}$	$\frac{Y}{cQ}$ %	$\frac{E_1}{cQ}$ %	$\frac{E_2}{cQ}$ %	$\frac{E_2}{cQ}$ %
1	1	0.53	1	38.2	6.1	59.4	0
2	0.8	1.25	2.65	59.8	5.65	31.5	3
3	2	1.85	2.86	51.2	5.7	32.5	10.6
4	0.86	1.85	3.84	41.2	6.1	17.5	35.2
5	0.4	1.85	5	41.2	5.95	11	41.8
6	0.8	4.25	9	40.4	6	3	50.6
7	0.4	4.2	11.3	32.6	6.35	1.95	59.1

воздуха в газовой сфере возрастает с увеличением радиуса полости и при  $R_1/R_0 = 11.3$  составляет 59% полной энергии взрыва.

Автор благодарит Э. А. Широкову за помощь в работе.

Поступила 2 VII 1962

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Христофоров Б. Д. Параметры ударной волны и газового пузыря при подводном взрыве зарядов разной плотности из тэна и азиды свинца. ПМТФ, 1961, № 4.
2. Rice M. and Wals J. Equation of State of Water to 250 Kilobars. The Journal of Chemical Physics. April, 1957, vol. 26, № 4.
3. Христофоров Б. Д. Параметры ударной волны в воздухе при взрыве зарядов из тэна и азиды свинца разной плотности. ПМТФ, 1961, № 6.
4. Зелдович Я. Б., Райзер Ю. П. Ударные волны большой амплитуды в газах. УФН, 1952, № 1.
5. Коротков П. Ф. Об ударных волнах на значительном расстоянии от места взрыва. Изв. АН СССР, ОТН, 1958, № 3.

### ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ВОЗБУЖДЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ ЖИДКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Г. В. Димза

(Москва)

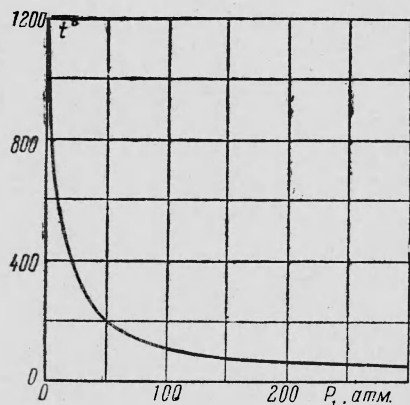
Возбуждение взрыва жидких взрывчатых веществ (ВВ) принято связывать с сжатием и разогревом находящихся внутри жидкости газовых включений, которые, как предполагают, всегда имеются в жидкости в виде пузырьков. Этот вопрос подробно разбирается в работах школы Боудена и освещен в многочисленных публикациях на эту тему [1].

При сжатии идеального газа до давления  $p_2$  его температура  $T_2$  может быть рассчитана (без учета тепловых потерь) по формуле

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \left( \gamma = \frac{C_p}{C_v} \right)$$

где  $T_1$ ,  $p_1$  — исходные температура и давление,  $C_p$  и  $C_v$  — удельные теплоемкости.

Как следует из формулы, температура разогрева  $T_2$  при одном и том же  $\Delta p$ , равном  $p_2 - p_1$ , сильно зависит от начального давления. По приведенному выше уравнению, условно считая  $p_2 - p_1$  постоянным и равным 200 атм, для двухатомного газа ( $\gamma = 1.4$ ) с начальной температурой  $T_1 = 293^\circ \text{K}$  была рассчитана изображенная



Фиг. 1

на фиг. 1 кривая, дающая зависимость температуры разогрева сжатого газа от величины начального давления  $p_1$ .

Повышение начального давления очень сильно влияет на величину нагрева газа при сжатии. Так подъем начального давления до 6 атм почти в два раза (с 1150 до 600° С) снижает температуру, до которой разогревается газ. Отсюда вытекает, что, если инициирование взрыва связано со сжатием ударной волной имеющихся в ВВ газовых включений и последующим поджиганием его горячим газом, то в случае нахождения взрывчатого вещества в начальный момент под давлением для получения достаточного повышения температуры  $\Delta T$  потребуется значительно большее давление в ударной волне.

Изложенные выше соображения могут быть проверены путем изучения особенностей передачи детонации при нормальном и повышенном давлении жидким взрывчатым веществам через жидкость (воду). Осуществляя опыты по такой схеме, можно говорить о «чистом» действии ударной волны, так как наличие сравнительно большого слоя воды между пассивным и активным зарядами позволяет пренебречь действием продуктов взрыва активного заряда.

Для выполнения работы был выбран способ, позволяющий оценивать чувствительность жидких ВВ по расстоянию передачи детонации, вызываемой ударной волной, распространяющейся при взрыве электродетонатора в воде, заполняющей стальную трубу.